THE MAGNETIC FIELD OF THE GEOLOGICAL PAST OF THE EARTH

N. V. KORONOVSKY

The origin and methods of recognizing Earth's paleomagnetic field in the geological past are described in this article. The role of paleomagnetology for studying various geological events and its importance for proving modern global geological theories are examined.

Рассматривается современное магнитное поле Земли, его происхождение и возможности выявления магнитного поля геологического прошлого. Показана роль палеомагнитологии в изучении различных геологических явлений и ее значение в становлении современных геологических теорий.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРОШЛОГО ЗЕМЛИ

Н. В. КОРОНОВСКИЙ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Сегодня каждый школьник знает, что у Земли есть магнитное поле. С древнейших времен это исключительное явление природы занимало умы человечества. Ведь с магнитным полем связана не только навигация, но еще множество различных практических и научных задач – от поисков рудных месторождений до изучения внутреннего строения Земли. Палеомагнитология – учение о геомагнитном поле прошлых геологических эпох – как наука еще очень молода, ей чуть меньше 100 лет, но по-настоящему она стала развиваться лишь с середины 50-х годов нашего века и сыграла выдающуюся роль в становлении современной глобальной геологической теории – тектонике литосферных плит.

Магнитное поле современной Земли лучше всего описывается полем геоцентрического диполя с наклоном оси по отношению к оси вращения Земли в 11°,5. Центр диполя – элементарного бесконечно малого магнита – смещен в Восточное полушарие от центра Земли на 430 км. Силовые линии магнитного поля “входят” в планету вблизи Северного географического полюса и “выходят” вблизи Южного (рис. 1, *I*). Там, где силовые линии “входят” в земной шар, располагается Южный магнитный полюс. Следовательно, истинный Южный магнитный полюс находится вблизи Северного географического полюса, но так уж исторически сложилось, что Южный магнитный полюс для удобства договорились считать Северным.

Магнитное поле Земли является векторным и характеризуется положением вектора в пространстве и его напряженностью. Суммарный вектор **T**, изображенный на рисунке 1, *II*, разлагается на горизонтальную **H** и вертикальную **Z** составляющие. Угол *I* между горизонтальной составляющей **H** и полным вектором **T** называется магнитным наклонением, а угол *D* – между направлениями на магнитный и географический полюсы – магнитным склонением. Существуют карты линий равных величин магнитных склонений (изогон), линий равных магнитных наклонений (изоклин) и линий равных значений полной напряженности магнитного поля (изодинам). На Северном магнитном полюсе наклонение равно +90°, на Южном соответственно –90°. В пределах магнитного экватора, не совпадающего с географическим, наклонение равно нулю.

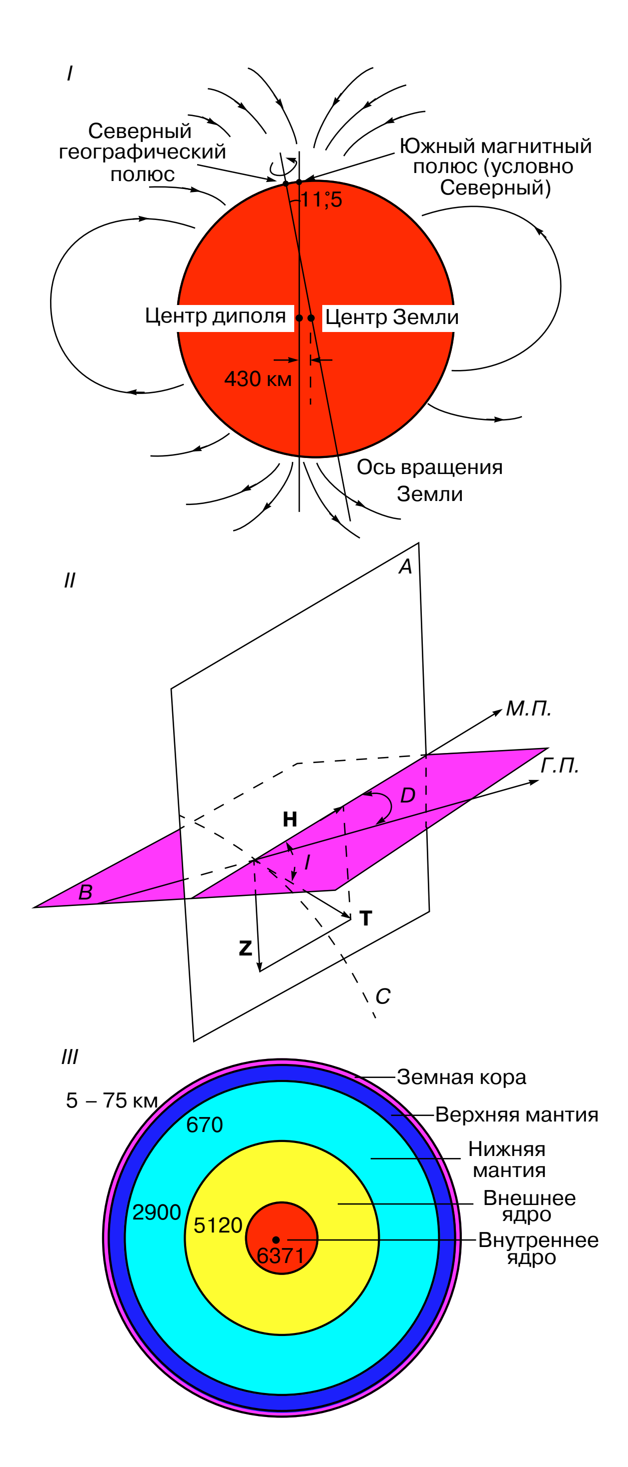


Рис. 1. Элементы магнитного поля Земли: *I* – соотношение магнитного диполя, силовых линий и оси вращения Земли; *II* – основные компоненты магнитного поля: *B* – поверхность Земли на ограниченном участке; *A* – вертикальная плоскость; *C* – магнитная силовая линия; составляющие полного вектора **T** магнитного поля: **H** – горизонтальная, **Z** – вертикальная; *I* – магнитное наклонение; *D* – магнитное склонение; *МП*– направление на магнитный полюс; *ГП* – направление на географический полюс; *III* – внутреннее строение Земли.

Напряженность современного магнитного поля составляет около 0,1 А/м, и считается, что в геологическом прошлом величина напряженности могла колебаться, но максимум на порядок величин. Геомагнитное поле Земли за последние 2,0 – 2,5 млрд. лет, что составляет больше половины ее геологической истории, принципиально не изменялось.

Еще в XVII веке было обнаружено изменение магнитного склонения со временем. Так называемые вековые вариации и всех остальных элементов магнитного поля Земли сейчас достоверно установлены и регулярно составляются специальные карты изопор, то есть линий равных годовых изменений какого-либо элемента магнитного поля. Такие карты можно использовать только в определенный, не более 10 лет, интервал времени в связи с периодичностью вековых вариаций, особенно "быстрых". Все магнитные материковые аномалии,например изогоны, то есть линии равных магнитных склонений, медленно, со скоростью 22 км в год (0,2% в год), смещаются в западном направлении (западный дрейф), что объясняется разной угловой скоростью относительного вращения ядра и мантии Земли.

Происхождение магнитного поля Земли и по сей день остается загадкой для ученых, хотя существует много гипотез для объяснения этого феномена. То магнитное поле, которое существует на земной поверхности, является суммарным полем, образованным за счет ряда источников: 1) токов, пересекающих поверхность Земли, так называемого "вихревого" поля; 2) внешних, космических источников, не связанных с Землей, и, наконец, 3) магнитного поля, обусловленного причинами внутренней динамики Земли. Этот последний источник вносит наибольший вклад в формирование геомагнитного поля и именно его генезису посвящено большинство гипотез.

Внутреннее строение Земли сейчас хорошо изучено с помощью сейсмических волн, возникающих от землетрясений и искусственных взрывов и пронизывающих Землю по всем направлениям, как бы "просвечивая" ее. Установлено, что до глубины 2900 км вещество сферических оболочек Земли твердое, а ниже и до уровня 5120 км обладает свойствами жидкости, так как через него не проходят поперечные сейсмические волны, в которых частицы колеблются перпендикулярно направлению распространения волны. Модуль сдвига в жидкости равен нулю, и именно поэтому внешнему ядру приписываются свойства жидкости. Внутреннее ядро с глубины 5120 км и до центра Земли (6371 км) слагается твердым веществом (рис. 1, *III*).

Проблема происхождения магнитного поля Земли до настоящего времени не может считаться окончательно решенной, хотя почти общепризнанной является гипотеза магнитного гидродинамо, основанная на признании существования жидкого внешнего ядра. Тепловая конвекция, то есть

перемешивание вещества во внешнем ядре, способствует образованию кольцевых электрических токов. Скорость перемещения вещества в верхней части жидкого ядра будет несколько меньше, а нижних слоев – больше относительно мантии в первом случае и твердого ядра – во втором. Подобные медленные течения вызывают формирование кольцеобразных (тороидальных) замкнутых по форме электрических полей, не выходящих за пределы ядра. Благодаря взаимодействию тороидальных электрических полей с конвективными течениями во внешнем ядре возникает суммарное магнитное поле дипольного характера, ось которого примерно совпадает с осью вращения Земли. Для "запуска" подобного процесса необходимо начальное, хотя бы очень слабое, магнитное поле, которое может генерироваться гиромагнитным эффектом, когда вращающееся тело намагничивается в направлении оси его вращения.

Формирование магнитного поля Земли объясняется с помощью модели магнитного гидродинамо, упрощенно изображенной на рисунке 2, *I*. В первоначальном слабом магнитном поле C_0 (красные линии), направленном примерно вдоль оси *A*, вращается проводящий диск. Между щеткой *B* и осью вращения *A*, согласно закону индукции Фарадея, образуется разность потенциалов, что вызывает электрический ток в цепи *DA*'. Возникшее при этом магнитное поле (синие линии) будет его усиливать, и тем больше, чем быстрее вращение. Реальные процессы, происходящие в земном ядре, конечно, намного сложнее и описываются законами магнитогидродинамики, изучающей магнитные и электрические свойства проводящей жидкости. Гипотеза однодискового магнитного гидродинамо, однако, не объясняет смену знака полярности магнитного поля Земли, которая, как мы увидим ниже, играет важную роль в палеомагнитологии. Таким образом, гипотеза возникновения геомагнитного поля за счет конвекции проводящего жидкого вещества внешнего ядра и вращения Земли на сегодняшний день является наиболее разработанной и общепризнанной.

Поскольку магнитное поле Земли аппроксимируется центральным диполем с круговой симметрией по отношению к оси этого диполя, то это позволяет по магнитному склонению *D* и магнитному наклонению *I*, измеренным в любой точке поверхности земного шара, определить географические координаты – широту и долготу положения геомагнитного полюса.

Магнитные свойства горных пород определяются содержанием и ориентировкой в них минеральных зерен с различными магнитными характеристиками. Все вещества разделяются на диамагнитные, парамагнитные и ферромагнитные. Первые характеризуются тем, что их атомы не имеют постоянных магнитных моментов и общий магнитный момент атома диамагнетика равен нулю. Атомы вторых уже обладают собственными магнитными моментами, а ферромагнетики характеризуются упорядоченным (параллельным) расположением магнитных моментов в атомах. Для ферромагнетиков существует уровень температуры, так называемая точка Кюри, выше которой упорядочение магнитных моментов не сохраняется, поэтому лавы вулканов обретают намагниченность только после их остывания ниже

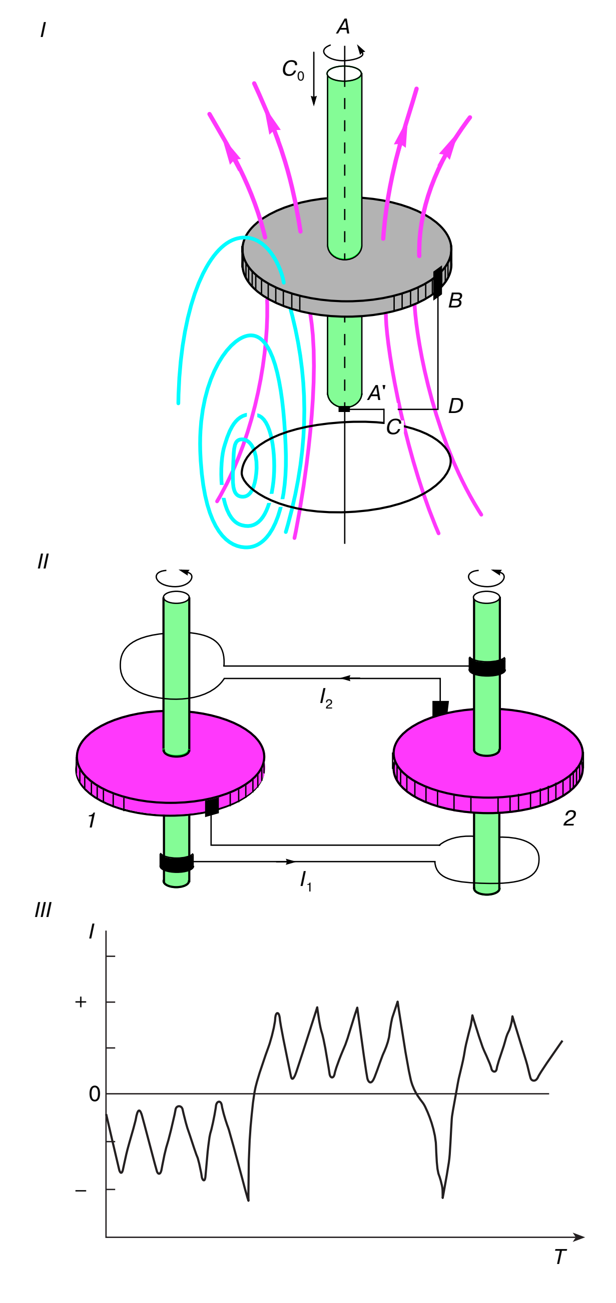


Рис. 2. Модели однодискового (*I*) и двухдискового (*II*) динамо; *III* – колебания токовой переменной в системе, сходной с двухдисковым динамо.

точки Кюри. К ферромагнетикам относятся также ферримагнетики, атомы которых имеют разные по своему значению магнитные моменты. Ферромагнетики в горных породах являются главными носителями магнитных свойств. Учитывая, что зерна ферро- и ферримагнитных минералов составляют в горных породах незначительный процент, можно прийти к выводу, что намагниченность последних очень слабая.

Любая горная порода, осадочная или магматическая, в момент своего образования приобретает намагниченность по направлению и по величине магнитного поля данного конкретного отрезка времени. Если это осадочная порода, то магнитные частицы, оседая на дно озера, моря или океана, будут ориентироваться по направлению силовых линий геомагнитного поля, существующего в это время и в этом месте. Магматические горные породы, лавовые потоки, интрузивные массивы, застывающие либо на поверхности Земли, либо в земной коре на глубинах в километры, приобретут намагниченность после достижения ими точки Кюри, которая отличается для различных по составу магматических пород. Направление приобретенной намагниченности совпадает с направлением вектора напряженности магнитного поля данного времени в данной точке. В случае осадочных пород приобретенная намагниченность называется ориентационной, в случае изверженных – термоостаточной.

Не вдаваясь в довольно сложные характеристики видов намагниченности горных пород и факторов, ее определяющих, подчеркнем ведущую для палеомагнитологии роль естественной остаточной намагниченности. Этот вид намагниченности, будучи однажды приобретенным породой, при благоприятных условиях сохраняется длительное время. Если мы вырежем из горной породы ориентированный в пространстве образец, то можно измерить остаточную намагниченность этой горной породы, а, следовательно, установить направление силовых магнитных линий той эпохи, в которой данная горная порода сформировалась, и, как следствие, вычислить положение геомагнитного полюса, так называемого виртуального, исходя из предположения, что геомагнитное поле представляет собой поле центрального осевого диполя. Проводя замеры следов геомагнитного поля геологического прошлого в массовом порядке в горных породах различного возраста и на разных континентах, а также при бурении глубоководных скважин в океанах, мы получаем возможность выявить эволюцию геомагнитного поля Земли, как бы восстановить его историю. В этом и заключается суть палеомагнитологии.

Инверсии магнитного поля – это смена знака осесимметричного диполя. В 1906 году Б. Брюн, измеряя магнитные свойства неогеновых, сравнительно молодых лав в центральной Франции, обнаружил, что их намагниченность противоположна по направлению современному геомагнитному полю, то есть Северный и Южный магнитные полюса как бы поменялись местами. Наличие обратно намагниченных горных пород является следствием не каких-то необычных условий в момент ее образования, а результатом инверсии магнитного поля Земли в данный момент. Обращение полярности геомагнитного поля – важнейшее открытие в палеомагнитологии, позволившее создать новую науку магнитостратиграфию, изучающую расчленение отложений горных пород на основе их прямой или обращенной намагниченности. И главное здесь заключается в доказательстве синхронности этих обращений знака в пределах всего земного шара. В таком случае в руках геологов оказывается весьма действенный метод корреляции отложений и событий. Обращение знака геомагнитного поля, как уже говорилось, не могло быть объяснено в рамках теории однодискового динамо. В 60-х годах нашего века известный японский геофизик Т. Рикитаки предположил, что каждую конвективную ячейку или вихрь в жидком внешнем ядре можно считать как бы одним диском динамо. Модель простейшего двухдискового динамо (рис. 2, *II*) показала, что ток I_1 от диска *1* перетекает в диск *2*, генерируя магнитное поле – ток I_2, от которого, в свою очередь, усиливается магнитное поле около диска 1 (рис. 2, *III*). Токовая (I), а следовательно, и магнитная переменная колеблются сначала около некоторого стационарного состояния, а затем, увеличивая амплитуду, внезапно начинают испытывать колебания уже вокруг другого стационарного состояния (по Т. Рикитаки, 1968). Таким образом, моделируется возможность инверсий магнитного поля. В реальном магнитном поле Земли время, в течение которого происходит изменение знака полярности, может быть как коротким, вплоть до тысячи лет, так и составлять миллионы лет.

Магнитостратиграфическая шкала является, по существу, глобальной шкалой геомагнитной полярности за наблюдаемую часть геологической истории. В настоящее время проведены сотни тысяч определений прямой и обратной полярности в образцах горных пород различного возраста, датированных как с помощью изотопных радиологических методов, то есть с получением абсолютного возраста породы, так и с помощью методов относительной геохронологии, то есть палеонтологических методов.

Первая такая шкала для последних 3,5 млн. лет была создана в 1963 году А. Коксом, Р. Доллом и Г. Далримплом. В пределах этого интервала они установили две зоны прямой полярности (как современное поле) и одну зону обращенной. С тех пор составлено много магнитостратиграфических шкал, полнота и нижний возрастной предел которых все увеличиваются, а само расчленение становится все более дробным.

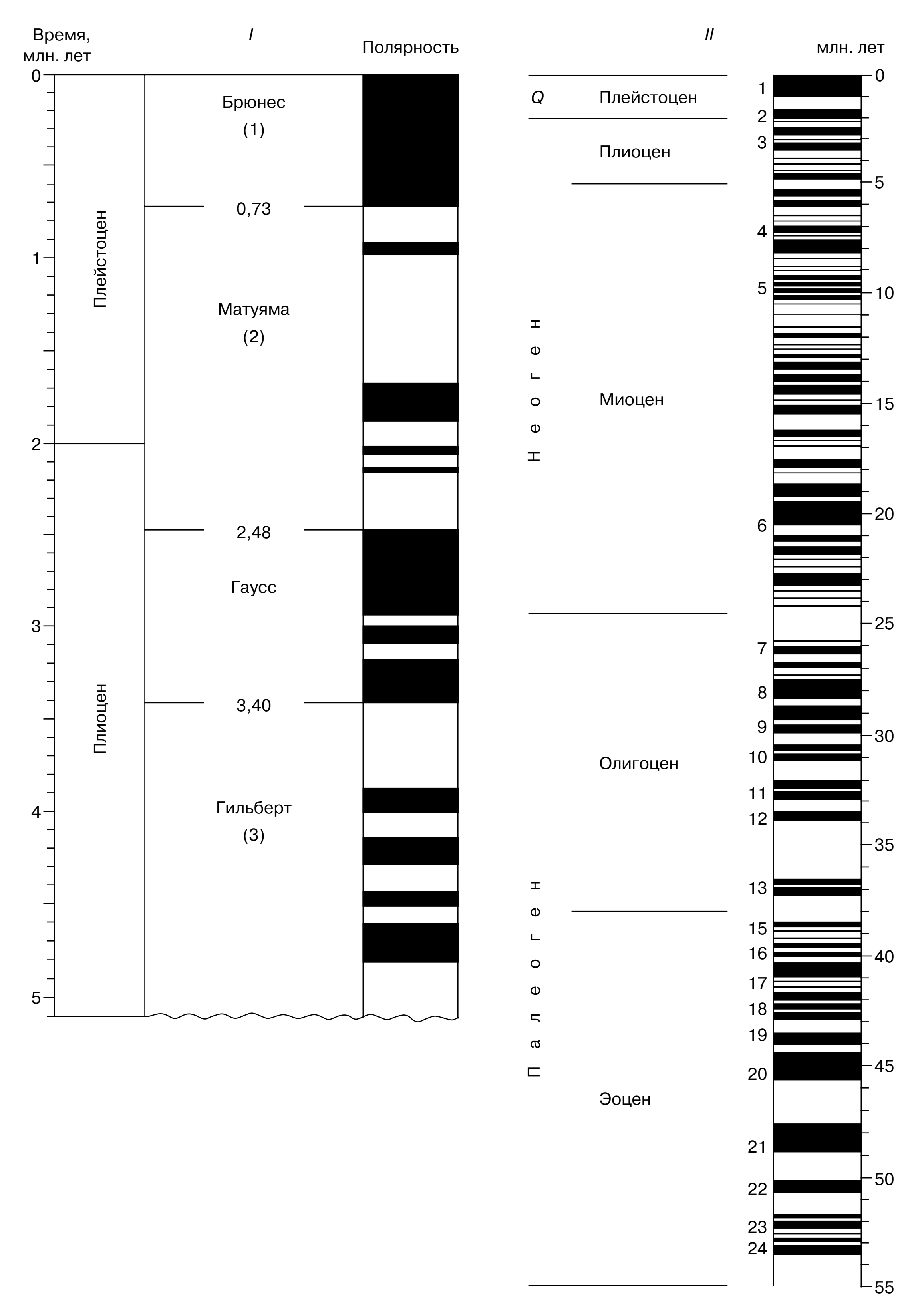


Рис. 3. Шкалы инверсий магнитного поля: *I* – за последние 5 млн. лет; *II* – за последние 55 млн. лет. Черный цвет – нормальная намагниченность, белый цвет – обратная намагниченность (по У.У. Харленду и др., 1985).

Временные интервалы преобладания какой-либо одной полярности получили название геомагнитных эпох, и части из них присвоены имена выдающихся геомагнитологов Брюнесса, Матуямы, Гаусса и Гильберта (рис. 3). В пределах эпох выделяются меньшие по длительности интервалы той или иной полярности, называемые геомагнитными эпизодами. Наиболее эффектно выявление интервалов прямой и обратной полярности геомагнитного поля было проведено для молодых в геологическом смысле лавовых потоков в Исландии, Эфиопии и других местах. Недостаток этих исследований заключается в том, что процесс излияния лав был прерывистым процессом, поэтому вполне возможен пропуск какого-либо магнитного эпизода.

Совсем другое дело, если измеряются магнитные свойства горных пород осадочной толщи в океанах при бурении глубоководных скважин. Такое бурение стало возможным в 1968 году, когда его осуществили на специальном буровом судне "Гломар Челленджер", а позднее – с судна "Джойдес Резолюшн". За это время пробурено уже свыше тысячи скважин в разных океанах и некоторые из них углубились в породы морского дна на 1,5 км.

Самое главное преимущество изучения магнитных свойств керна скважин (столбика высверленных горных пород) заключается в непрерывности стратиграфического разреза, когда нет пропуска в слоях, и мы уверены в полноте геологической летописи. Анализ магнитных свойств образцов из пород океанского дна позволил составить детальную шкалу инверсий поля до поздней эпохи юрского периода включительно, то есть на интервал времени в 170 млн. лет, что дало возможность реконструировать магнитное поле Земли за это время.

До рубежа в 570 млн. лет – для всего фанерозоя – такая шкала тоже создана, но она хуже по качеству. Есть шкала и для рифея–венда (1,7 – 0,57 млрд. лет), однако она еще менее удовлетворительна.Остаточная намагниченность обнаруживается даже у архейских пород с возрастом 3,4 млрд. лет. Распределение геомагнитных инверсий во времени характеризуется довольно сложной ритмичностью, состоящей как из длительных, так и кратких интервалов обращения знака поля.

Идея о разрастании океанской коры, или спрединга, и палеомагнитология тесно связаны между собой. Гениальные догадки ученых конца XIX – начала XX века, и в первую очередь знаменитого метеоролога Альфреда Вегенера о том, что в далеком прошлом материки занимали совсем другое положение на поверхности земного шара, нежели сейчас, основывались лишь на сходстве очертаний береговых линий материков. И только в 60-х годах была выдвинута идея о разрастании океанической коры, или океанического дна, когда Г. Хесс и Р. Дитц в 1961 – 1962 гг. опубликовали статьи, ставшие уже вехами в геологической истории. Наращивание океанической коры происходит в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов, где базальтовая магма поднимается вверх по трещинам вследствие конвективных движений относительно нагретого вещества мантии.

Попадая в условия океанского дна в рифтовых ущельях, магма не только изливается на дно, но как бы расталкивает его в стороны, внедряясь все новыми и новыми порциями. Естественно, что базальтовая магма, остывая, проходит точку Кюри и намагничивается по направлению силовых линий данной магнитной эпохи.

В 1958 году впервые была установлена полосчатая форма магнитных аномалий северо-западной части дна Тихого океана. Сравнительно неширокие, до 40 км, полосы были намагничены то отрицательно, то положительно, причем интенсивность намагничивания вдоль каждой из полос практически не менялась. Такой же полосовидный характер магнитного поля в последующие годы был обнаружен во всех океанах, включая узкие моря типа Красного (рис. 4).

Мало того, оказалось, что полосы магнитных аномалий разного знака расположены симметрично по отношению к оси срединно-океанических хребтов. Подобная картина распределения магнитных аномалий требовала объяснений, которые и не замедлили появиться в 1963 году в статье выпускника Кембриджского университета Ф. Вайна и его научного руководителя Д. Мэтьюса. Обратная и прямая намагниченность полос базальтов прямо связана с их возрастом. Приобретая знак намагниченности в момент своего образования, базальты впоследствии раздвигаются в стороны новыми порциями магмы, которые, в свою очередь, приобретают знак полярности уже другой эпохи, когда осуществилась инверсия магнитного поля. Периодические инверсии и создают "матрацевидную" картину магнитного поля, а ее симметричность объясняется разрастанием, спредингом (spread – разрастание, расширение) океанского дна.

Таким образом, были соединены две продуктивные идеи, и проблема объяснения строения и эволюции океанского дна была решена. Ширина полос магнитных аномалий одного знака в океанах, расположенных по обе стороны от срединного хребта, прямо пропорциональна длительности эпох полярности. На этом основании были проведены линии одинакового возраста океанской коры – изохроны, и каждой аномалии присвоен свой номер. Подтверждение этой картины дали результаты глубоководного бурения, так как оказалось, что возраст осадков океанского дна над магнитными аномалиями хорошо совпадает с рассчитанным возрастом самих магнитных аномалий. Сейчас составлены детальные карты возраста океанской коры, и геологические события последних 170 млн. лет четко к ним привязываются (рис. 5).

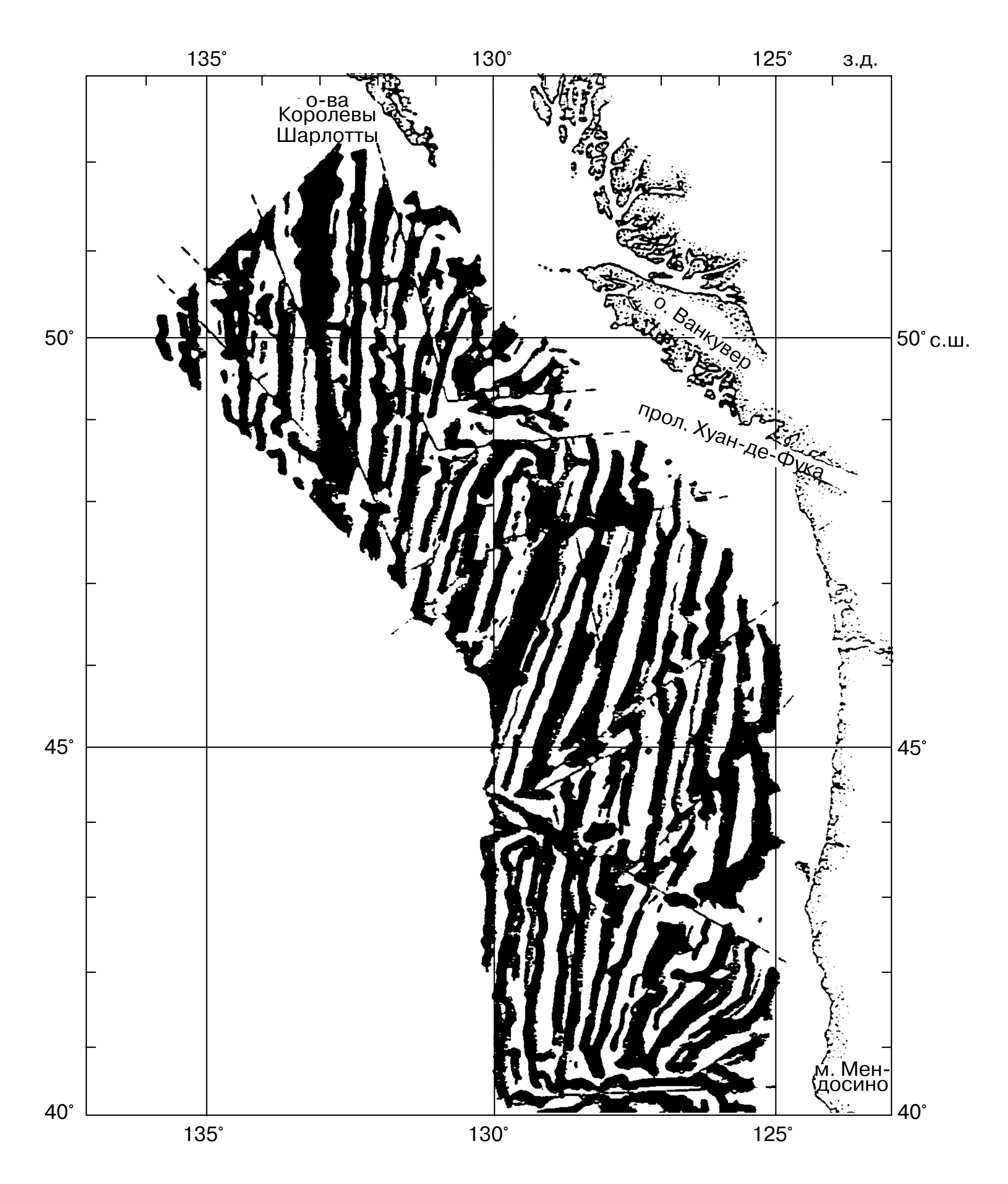


Рис. 4. Полосовидные магнитные аномалии в Северо-Восточной части Тихого океана, открытые А. Раффом и Р. Мейсоном в 1961 г. Черным цветом показаны положительные аномалии.

Мобилистская концепция начала XX века нашла полное подтверждение в данных палеомагнитологии уже в шестидесятых годах. Когда появилась возможность по отобранным породам одного возраста, но взятым на разных континентах, определять положение палеомагнитных полюсов интересующего нас временного интервала, то оказалось, что вычисленный осредненный полюс, скажем, по верхнеюрским породам (170 – 144 млн. лет) Северной Америки и такой же полюс по таким же породам Европы будут находиться в разных местах. Получалось как бы два Северных полюса, чего при дипольной системе быть не может. Для того чтобы Северный полюс был один,следовало изменить положение континентов на поверхности Земли. В нашем случае это означало сближение Европы и Северной Америки до совпадения их бровок шельфа, то есть до глубин океана примерно в 200 м. Иными словами, двигаются не полюсы, а континенты.

Подобные операции сейчас проделаны многократно, и траектории кажущихся движений полюсов во времени построены для разных материков. Эти траектории не совпадают между собой и, чтобы добиться их совмещения, следует сдвинуть материки. Восстановление взаимного расположения континентов в геологическом прошлом основано на палеомагнитных данных, и в наше время получены настолько убедительные подтверждения их

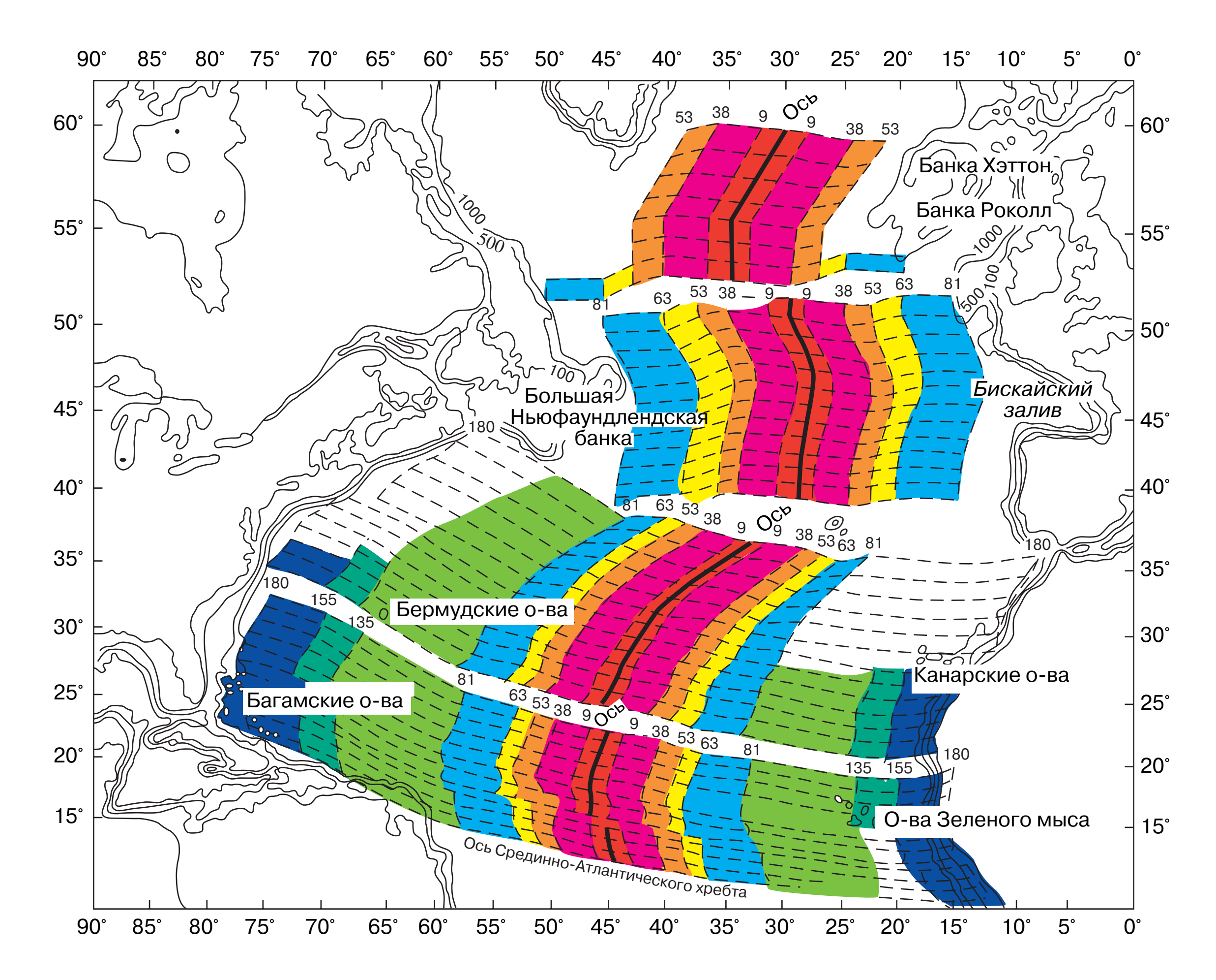


Рис. 5. Карта возраста пород океанического дна в Северной Атлантике, составленная по магнитным аномалиям У. Питменом и М.Тальвани в 1972 г. и впоследствии подтвержденная результатами глубоководного бурения. Разными цветами выделены участки океанского дна различных возрастных интервалов. Цифры обозначают миллионы лет.

перемещений, что вряд ли возможно сомневаться в медленных, но постоянных движениях литосферных плит, несущих на себе материки. Следует учитывать, что, проводя палеомагнитные исследования, мы получаем два параметра: направление на полюс и широту, что и позволяет определить положение виртуального полюса данной эпохи. Долгота установлена быть не может.

Применение палеомагнитного метода позволило осуществить детальные реконструкции раскрытия относительно молодых Атлантического, Индийского, Северного Ледовитого океанов и понять историю развития более древнего Тихого океана. Современное расположение континентов – это результат раскола суперконтинента Пангея, начавшегося около 200 млн. лет тому назад. Линейное магнитное поле океанов дает возможность определить скорость движения плит, а его рисунок дает наилучшую информацию для проведения геодинамического анализа.

Благодаря палеомагнитным исследованиям установили, что раскол Африки и Антарктиды произошел 160 млн. лет назад. Наиболее древние аномалии с возрастом 170 млн. лет (средняя юра) обнаружены по краям Атлантики у берегов Северной Америки и Африки. Это и есть время начала распада суперматерика. Южная Атлантика возникла 120 – 110 млн. лет назад, а Северная значительно позже (80 – 65 млн. лет назад) и т.д. Подобные примеры можно привести по любому из океанов и, как бы “читая” палеомагнитную летопись, реконструировать историю их развития и перемещение литосферных плит.

В 1995 году Д.М. Печерским и А.Н. Диденко была предпринята попытка реконструкции древнего Палеоазиатского океана, существовавшего в интервале времени венд–средний палеозой (660 – 360 млн. лет). Такая реконструкция основывалась на изучении палеомагнитной характеристики древних океанических пород, так называемой офиолитовой ассоциа-

ции, обладающей полным сходством с разрезом современной океанской коры. Это один из первых опытов изучения именно океана, а не континента, и он дал блестящие результаты, подтвердив, например, существование линейной структуры аномального магнитного поля и в древних океанах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Палеомагнитология как наука о магнитном поле геологического прошлого Земли имеет не такую уж большую историю, но использование информации, полученной на ее основе, позволили сделать большой шаг в изучении геологической истории нашей планеты.

Изучение магнитных свойств горных пород, построение магнитной модели литосферы, то есть верхней оболочки Земли, оценка элементов древнего магнитного поля, выявление зон прямой и обратной намагниченности (инверсий магнитного поля) – все это привело к созданию шкалы геомагнитной полярности, шкалы линейных магнитных аномалий океанов, а также к использованию магнитных характеристик горных пород для возрастной корреляции геологических событий (магнитостратиграфии).

Построение кривых миграций магнитных полюсов за сотни миллионов лет для разных материков явилось основой подтверждения перемещений литосферных плит по поверхности Земли и внесло важнейший вклад в создание новой глобальной геологической теории – тектоники литосферных плит.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Палеомагнитология / Под ред. А.Н. Храмова. Л.: Недра, 1982. 312 с.

Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. 592 с.

Брагинский С.И. Геомагнитное динамо //Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1978. № 9. С. 74 – 90.

Нагата Т. Магнетизм горных пород.М.: Мир, 1965. 247 с.

Буров Б.В., *Нургалиев Д.К.*, *Ясонов П.Г.* Палеомагнитный анализ. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1986, 167 с.

Печерский Д.М., *Диденко А.Н.* Палеоазиатский океан. Петромагнитная и палеомагнитная информация о его литосфере. М., 1995. 295 с.

Рикитаки Т. Электромагнетизм и внутреннее строение Земли. Л.: Недра, 1968. 331 с.

* * *

Николай Владимирович Короновский, профессор, зав. кафедрой динамической геологии Геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Заслуженный деятель науки Российской Федерации; специалист в области вулканизма, тектоники и региональной геологии Альпийского пояса; автор учебников “Краткий курс региональной геологии СССР” (1976, 1984), “Основы геологии” (соавтор А.Ф. Якушова), ряда монографий и 235 статей по различным вопросам геологии.